

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv uchycení optického vlákna s Braggovskou mřížkou na
chování magnetostrikčních materiálů**

**Influence of Mounting of the Optical Fiber Bragg Grating on
Magnetostrictive Materials**

2018

Jakub Tureček

Zadání bakalářské práce

Student:

Jakub Tureček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv uchycení optického vlákna s Braggovskou mřížkou na chování
magnetostrikčních materiálů
Influence of Mounting of the Optical Fiber Bragg Grating on
Magnetostriuctive Materials

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Magnetostrikční materiály jsou vhodné pro převod magnetické indukce a intenzity magnetického pole na změny jejich rozměrů. Ty lze pak snímat opticky a měřit tímto způsobem magnetická pole. Při řešení práce postupujte podle následujících pokynů:

1. Popište magnetostrikční materiály a vlastní jev magnetostrikce.
2. Popište chování Braggovských mřížek a jejich očekávanou citlivost pro měření magnetických polí.
3. Realizujte uchycení mřížky na magnetostrikční materiály.
4. Změřte posun Braggovské vlnové délky v závislosti na působícím magnetickém poli.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1]Saleh,B.E.A., Teich,M.C.: Fundamentals of Photonics. 2nd edition, John Wiley and Sons Inc. Hoboken, New Jersey, 2007, ISBN: 978-0-471-35832-9
[2]Podle pokynů vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

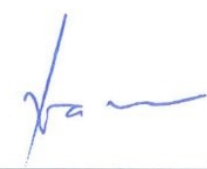
Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2018

Jureček
.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je zkoumání vlivu uchycení optického vlákna s Braggovskou mřížkou na chování magnetostrikčních materiálů. Úvodní část bakalářské práce je věnována objasnění a popisu základních pojmů – magnetostrikční jev a magnetostrikční materiály. Následující kapitola se zabývá principy, díky kterým Braggovská mřížka odráží světlo o určité vlnové délce. Tato kapitola obsahuje také popis tohoto jevu. Praktická část je zaměřena na uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálu. Následně bude provedeno měření odražených vlnových délek světla, popis měření a měřicích přístrojů a, na závěr, budou vyhodnoceny výsledky.

Klíčová slova

magnetostrikční jev; magnetostrikční materiály; Braggovská mřížka; vlnová délka světla; odraz světla

Abstract

The subject of this bachelor thesis is the study of the influence of optical fibers with Bragg grating on behaviour of magnetostrictive materials. The theoretical part of the bachelor thesis is devoted to clarification and description of basic concepts - magnetostrictive phenomenon and magnetostrictive materials. The following chapter deals with the principles that Bragg grating reflects light at a certain wavelength. This chapter also contains a description of this phenomenon. The practical part is focused on attaching the Bragg grating to the magnetostrictive material. Subsequently, measurements of the reflected wavelengths of the light, the description of the measurement and the measuring instruments will be carried out and, of course, the results will be evaluated.

Key words

magnetostrictive phenomenon; magnetostrictive materials; Bragg grating; wavelengths of the light; light reflection

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
c	m/s	Rychlost světla ve vakuu
f	Hz	Frekvence
l	mm	Délka
n	-	Index lomu
n_{ef}	-	Efektivní index lomu
v	m/s	Rychlost světla v prostředí
A	dB	Útlum
B	T	Magnetická indukce
H	A/m	Intenzita magnetického pole
P	W	Výkon
P_{nam}	W	Naměřený výkon
P_{ref}	W	Referenční výkon
T	°C	Teplota
θ_c	°	Kritický úhel
θ_B	°	Braggovský úhel
λ	-	Koeficient magnetostrikce
λ	nm	Vlnová délka světla
λ_s	-	Nasycená magnetostrikce
λ_B	nm	Braggovská rezonanční vlnová délka světla
μ	H/m	Permeabilita
μ_o	H/m	Permeabilita vakua
μ_r	-	Relativní permeabilita
Δl	mm	Poměrné prodloužení
Λ	nm	Perioda Braggovské mřížky

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ppm	Parts per milion - Dílů na milión
BP	Bakalářská práce
OSNR	Optical Signal-To-Noise Ratio - Poměr signálu k šumu
PMMA	Polymethylmethakrylát
WDM	Wavelength-Division Multiplexing - Multiplexování vlnovými délkami

Seznam ilustrací a tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Chaotická orientace jednotlivých domén feromagnetického materiálu	16
2.1	Orientace domén v závislosti na materiálu a vlivu magnetického pole	17
2.2	Orientace domén před a během působení vnějšího magnetického pole a patrná změna rozměrů	18
2.3	Graf typického průběhu sycení magnetostrickce do bodu nasycení	18
2.4	Křivky prvotní magnetizace monokrystalu železa pro magnetizace v různých směrech působení při pokojové teplotě	19
2.5	Znázornění principu Wiedemannova jevu	20
2.6	Tabulka s uvedenou magnetostrickí ve dvou směrech vybraných feromagnetických materiálů při pokojové teplotě	20
3.1	Elektromagnetické spektrum	22
3.2	Závislost indexu lomu na vlnové délce pro různé vlnovody	23
3.3	Příklad průchodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího	24
3.4	Dopad světla pod různými úhly na rozhraní mezi dvěma prostředími	25
3.5	Závislost indexu lomu ve vlnovodu na vlnové délce světla pro jednotlivé složky bílého světla, rozklad bílého světla na rozhraní dvou prostředí, na třetím obrázku je znázorněn optický hranol a na čtvrtém optická čočka	26
3.6	Časové zpoždění pulsu způsobené průchodem přes disperzní prvek	26
3.7	Odraz světla dopadajícího na M počet ploch	27
3.8	Braggovská mřížka vepsaná v jádře optického vlákna, periodická změna indexu lomu a spektrální odezva	28
3.9	Typické blokové schéma zapojení Braggovské mřížky	29
3.10	Čerpovaná Braggovská mřížka určená pro kompenzaci disperze se spektry rozloženými v čase	29
4.1	Parametry Braggovských mřížek	31

4.2	Lámačka optických vláken Fujikura CT-30 a zdrhovací kleště	33
4.3	Tavná svářečka Fujikura FSM-45PM	33
5.1	Návrh optické trasy pro zapojení a měření	34
5.2	Laserový zdroj EXFO FLS-2600B	34
5.3	Neoznačený SLED zdroj	35
5.4	Optický spektrální analyzátor THORLABS OSA 203	35
5.5	Uchycená Braggovská mřížka epoxidovým lepidlem	36
6.1	Braggovská mřížka umístěna na kulatém feritovém magnetu	38
6.2	Braggovská mřížka umístěna na feritovém anizotropním magnetu	39
6.3	Neodymový magnet použitý při měření	41
6.4	Graf útlumů při měření na neodymovém magnetu	45

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
6.1	Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet umístěný přímo, SLED zdroj	39
6.2	Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet umístěný přímo, laserový zdroj	40
6.3	Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj	40
6.4	Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet umístěný přímo, SLED zdroj	40
6.5	Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet umístěný přímo, laserový zdroj	41
6.6	Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj	41
6.7	Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet umístěný přímo, SLED zdroj	42

6.8	Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet umístěný přímo, laserový zdroj	42
6.9	Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj	42
6.10	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet umístěný přímo, SLED zdroj	43
6.11	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 1mm, SLED zdroj	43
6.12	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet umístěný přímo, laserový zdroj	43
6.13	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj	44
6.14	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 2 mm, laserový zdroj	44
6.15	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 3 mm, laserový zdroj	44
6.16	Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 4 mm, laserový zdroj	44

Obsah

Seznam ilustrací a tabulek.....	- 9 -
Úvod.....	- 14 -
1 Magnetické materiály.....	- 15 -
1.1 Relativní permeabilita	- 15 -
1.2 Magnetický moment atomu.....	- 15 -
1.3 Diamagnetické materiály.....	- 15 -
1.4 Paramagnetické materiály	- 16 -
1.5 Feromagnetické materiály	- 16 -
2 Magnetostrikční jev.....	- 17 -
2.1 Nasycení magnetostrikce.....	- 18 -
2.2 Anizotropie materiálu a magnetostrikce.....	- 19 -
2.3 Wiedemannův jev.....	- 20 -
2.4 Magnetostrikční materiály.....	- 20 -
2.4.1 Terfenol-D.....	- 21 -
2.4.2 Galfenol.....	- 21 -
2.4.3 Neodymový magnet	- 21 -
3 Braggovská mřížka.....	- 22 -
3.1 Základní předpoklady.....	- 22 -
3.1.1 Světlo.....	- 22 -
3.1.2 Index lomu.....	- 23 -
3.1.3 Efektivní index lomu	- 24 -
3.1.4 Přejchod světla mezi různými prostředími	- 24 -
3.1.5 Úplný odraz světla.....	- 25 -
3.1.6 Rozklad světla	- 25 -
3.1.7 Braggovský odraz.....	- 26 -
3.1.8 Braggovská rezonanční vlnová délka	- 27 -
3.2 Braggovská mřížka.....	- 27 -
3.2.1 Čerpovaná Braggovská mřížka.....	- 29 -
3.2.2 Citlivost Braggovské mřížky	- 29 -

4	Praktická příprava před měřením	- 31 -
4.1	Braggovské mřížky k měření	- 31 -
4.2	Uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálem.....	- 32 -
4.3	Příprava Braggovské mřížky na svařování.....	- 32 -
4.4	Svařování optických vláken	- 33 -
5	Schéma zapojení optické trasy	- 34 -
5.1	Zdroje světla.....	- 34 -
5.1.1	Laserový zdroj	- 34 -
5.1.2	SLED zdroj.....	- 35 -
5.2	Optický cirkulátor	- 35 -
5.3	Optický spektrální analyzátor.....	- 35 -
5.4	Uchycená Braggovská mřížka.....	- 36 -
6	Praktické měření.....	- 37 -
6.1	Příprava měření	- 37 -
6.2	Postup měření	- 38 -
6.3	Měření s kulatým feritovým magnetem	- 38 -
6.4	Měření s anizotropním feritovým magnetem	- 39 -
6.4.1	Epoxidové lepidlo.....	- 39 -
6.4.2	Kyanoakrylátové lepidlo	- 40 -
6.5	Měření s neodymovým magnetem	- 41 -
6.5.1	Epoxidové lepidlo.....	- 42 -
6.5.2	Kyanoakrylátové lepidlo	- 43 -
6.6	Vyhodnocení měření	- 45 -
	Závěr	- 46 -
	Použitá literatura	- 47 -

Úvod

Braggovské mřížky v dnešní době slibují ohromný pokrok v senzorové technice, jejich velká šířka potencionálního využití, malá velikost, snadná manipulace a snadné zapojení jsou jen částí možných potencionálních výhod oproti jiným typům senzorů. Využití je třeba i pro kompenzaci disperze v optických trasách. K měření magnetických polí, magnetické indukce jsou však konvenční Braggovské mřížky samy osobě neúčinné, lépe psáno netečné. Proto je tato BP-bakalářská práce zaměřena na uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálu, který by měl přenést magnetické vlastnosti do Braggovské mřížky pomocí změny rozměru a ovlivnit tak odraženou vlnovou délku světla a tímto reagovat na magnetické pole.

1 Magnetické materiály

Magnetické materiály je možné rozdělit do tří kategorií, a to podle toho, jak interagují s magnetickým polem. Pokud materiál slabě zeslabuje magnetické pole, jedná se o materiál diamagnetický, pokud materiál slabě zesiluje magnetické pole, jedná se o materiál paramagnetický. Feromagnetické materiály jsou třetí kategorií, a tyto materiály silně zesilují magnetické pole. Toto rozdělení je možné především na základě relativní permeability materiálu μ_r . Dalším důležitým faktorem je magnetický moment atomu.

1.1 Relativní permeabilita

Jde o bezrozměrnou veličinu značenou μ_r . Tato veličina popisuje magnetické vlastnosti látek. Hodnota relativní permeability závisí na čistotě materiálu a vypočte se jako podíl permeability daného materiálu s permeabilitou vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.1)$$

Relativní permeabilita vztažená k jedné určuje, o jaký typ magnetického materiálu se jedná.

1.2 Magnetický moment atomu

Magnetický moment atomu lze považovat za vektor, jenž má vlastní velikost a orientaci. Matematicky jej lze popsat jako součet orbitálních a spinových magnetických momentů všech elektronů atomů, případně molekul. V důsledku rozdílné orientace orbitálních momentů elektronů je ve většině atomů magnetický moment vyrušen, u spárovaných elektronů se vyruší i spinové momenty. Obsahuje-li atom nespárované elektrony, mají pak atomy obvykle vlastní permanentní magnetický moment, neboť nedochází k úplné kompenzaci magnetických momentů. [1][2]

1.3 Diamagnetické materiály

Relativní permeabilita diamagnetických materiálů je menší než 1 ($\mu_r < 1$), avšak velmi se hodnotě 1 blíží.[1] Jestliže na diamagnetický materiál nepůsobí magnetické pole je magnetický moment nulový. Naopak, působí-li na tento typ materiálu magnetické pole, je magnetické pole diamagnetickými materiály zeslabeno, neboť se vnějším magnetickým polem indukují slabé dipóly, které působí v opačném směru než dané magnetické pole. Výsledné oslabení magnetického pole je ovšem, v porovnání se zesílením magnetického pole u paramagnetických a feromagnetických materiálů, tak slabé, že se oslabení může zanedbat a říci, že diamagnetické materiály s magnetickým polem neintegrují. Mezi diamagnetické materiály řadíme například vodu, zlato a měď.[2]

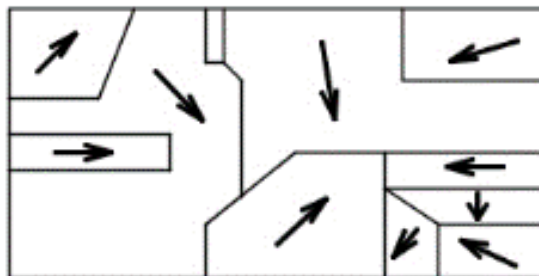
1.4 Paramagnetické materiály

Charakteristikou paramagnetických materiálů je relativní permeabilita mírně větší než 1 ($\mu_r > 1$). [1] Magnetický moment atomů je u těchto materiálů nenulový, bez působení vnějšího magnetického pole jsou magnetické momenty jednotlivých atomů orientovány nahodile, vzájemně se mezi sebou ovlivňují pouze nepatrně. Při působení magnetického pole se magnetické momenty snaží orientovat ve směru magnetického pole a takto zesilují účinek magnetického pole. Nicméně tak zvaný "tepelný pohyb" omezuje souhlasnou orientaci s magnetickým polem, a tak jsou magnetické momenty atomů od ideálního směru mírně vychýlené. K paramagnetickým materiálům řadíme například draslík, sodík a hliník. [2]

1.5 Feromagnetické materiály

Materiály feromagnetické se vyznačují relativní permeabilitou výrazně větší než 1 ($\mu_r \gg 1$). [1] Jednotlivé atomy těchto materiálů společně velmi intenzivně integrují, a to i bez ovlivnění vnějším magnetickým polem a mají stejnou orientaci magnetického momentu v určitých oblastech. Zmíněné oblasti se stejnou orientací nazýváme domény. Jejich objem je mezi 10^{-12} až 10^{-8} m^3 a počet atomů v nich se pohybuje v rozmezí 10^{17} až 10^{21} . [2]

Výše zmíněné domény se také nazývají, podle svého objevitele Pierra-Ernesta Weissse (1865-1940) Weissovy oblasti spontánní magnetizace a vznikají při chladnutí feromagnetických materiálů po tepelné úpravě. V těchto doménách se, i přes vliv tepelného pohybu, spiny jednotlivých atomů orientují stejným směrem, avšak výsledná magnetizace je nulová z důvodu chaotického uspořádání jednotlivých domén. [3]



Obrázek 1.1: *Chaotická orientace jednotlivých domén feromagnetického materiálu [3]*

2 Magnetostrikční jev

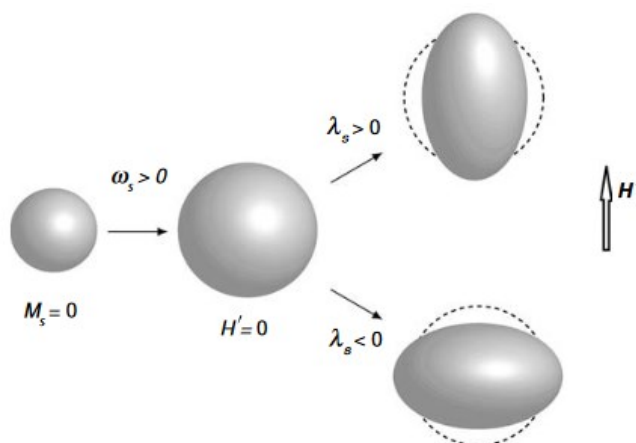
Magnetostrikční jev (magnetostrikce) je jev při kterém zmagnetizovaný materiál je vlivem působícího, vnějšího, magnetického pole nucen se deformovat, v tomto případě deformací rozumíme změnu jeho fyzických rozměrů, kdy se materiál prodlužuje či zkracuje. Jedná se o jev, jež se výrazněji projevuje pouze u feromagnetických materiálů. Můžeme ji též nazývat Jouleovou magnetostrikcí, případně Jouleovým efektem. Tuto změnu rozměrů popisuje vzorec (2.1), kde λ je koeficient magnetostrikce, Δl je změna rozměrů vzorku působícím magnetickým polem a l značí původní rozměr vzorku, λ nazýváme koeficientem magnetostrikce, případně poměrným prodloužením. [4]

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

Někteří výrobci uvádějí koeficient magnetostrikce v jednotkách ppm.

Další možností určité magnetostrikce je i děj opačný, kdy materiál mění své vlastnosti působením vnějšího mechanického namáhání, tento jev se nazývá Villariho jev, dále jsou známy i další jevy které se také souhrnně nazývají magnetostrikcí, ty budou popsány následně. [4]

Mechanismus magnetostrikce na atomární úrovni je poměrně složitý předmět, ale na doménové úrovni může být rozdělen do dvou odlišných procesů, změna rozměrů se nejvíce projevuje u feromagnetických materiálů v důsledku existence magnetických domén. Prvním procesem je migrace doménových stěn v materiálu v reakci na vnější magnetické pole. Za druhé, je to rotace domén. Tyto dva mechanismy umožňují materiálu měnit orientaci domény, což následně způsobuje změnu rozměrů. Vzhledem k tomu, že deformace je izochorická, tak dochází v opačném směru, ke změně magnetizace, k opačnému ději změny rozměru. [5]



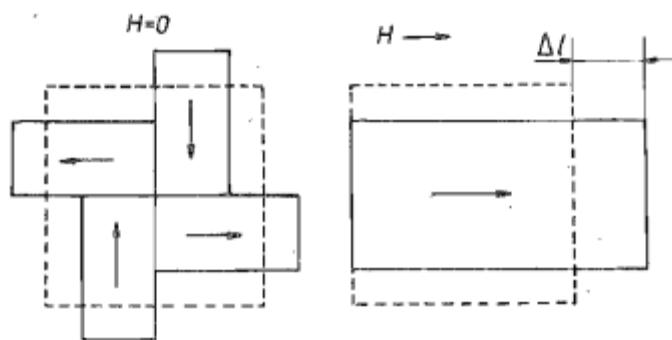
Obrázek 2.1: Orientace domén v závislosti na materiálu a vlivu magnetického pole [4]

Na obrázku (Obr. 2.1) lze vidět neorientovanou oblast paramagnetického materiálu, doménu feromagnetického materiálu, na kterou nepůsobí magnetické pole a domény feromagnetického materiálu na které působí magnetické pole, horní doména má kladný koeficient

magnetostrikce (prodlužuje se) a dolní doména má záporný koeficient magnetostrikce (zkracuje se) ke směru působícího magnetického pole.[4]

Jouleova magnetostrikce byla objevena roku 1842 Jamesem Joulem při zkoumání niklu. Obvyklý koeficient magnetostrikce je malý typicky $\lambda_s \approx 10^{-5}$, u čistého železa je $\lambda_s = -7 \cdot 10^{-6}$, kde λ_s značí prodloužení materiálu při nasycení magnetostrikce. [7]

Magnetostrikce se nemusí projevit pouze prodloužením feromagnetického materiálu, ale u některých materiálů zkrácením, například u niklu. Vlastnost magnetostrikce zaniká s překročením Curieho teploty, společně s feromagnetismem. [6]

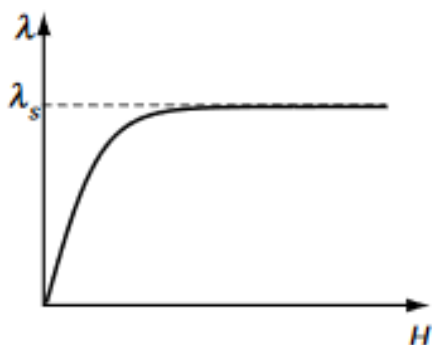


Obrázek 2.2: Orientace domén před a během působení vnějšího magnetického pole a patrná změna rozměrů[6]

Prodloužení Δl na obrázku (Obr. 2.2) je nadsazené pro potřebu ilustrace. Ve skutečnosti je metrová tyč vyrobená z materiálu s jednou z nejvyšších vlastností magnetostrikce $TbFe_2$ prodloužena v poli 1T zhruba o 1 mm. [6]

2.1 Nasycení magnetostrikce

Sycení magnetostrikce, je stav kdy se materiál vlivem změny intenzity vnějšího magnetického pole měnil skokově své rozměry na určitou hodnotu a dále mění své rozměry už jen velmi mírně, zanedbatelně, s další narůstající intenzitou magnetického pole. Tento bod, kdy materiál již nemění své rozměry se nazývá bod nasycení, nebo saturace (z angl.). [5]



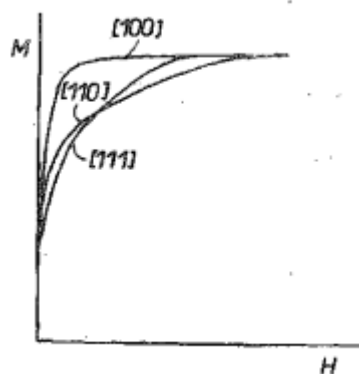
Obrázek 2.3: Graf typického průběhu sycení magnetostrikce do bodu nasycení [4]

V případě plné nasycenosti magnetostrikce jsou domény magnetostrikčního materiálu orientovány směrem působícího magnetického pole a jsou i v tomto směru uspořádány. Nasycená magnetostrikce se značí λ_s . [4]

2.2 Anizotropie materiálu a magnetostrikce

Co se týče anizotropních feromagnetik, tak v nich jsou směry, podle kterých je krystal snadněji zmagnetován oproti jiným možným směrům, takové směry popisujeme jako směry krystalografické. Na grafu 2.4 si ukážeme magnetizaci železa v různých směrech.[6]

Vlastnost anizotropie si můžeme představit například u dřeva, které se dá mnohem lépe rozdělit podél letokruhů nežli kolmo na ně.



Obrázek 2.4: Křivky prvotní magnetizace monokrystalu železa pro magnetizaci v různých směrech působení při pokojové teplotě [6]

Z grafu je patrné, že směrem nejsnazší magnetizace (nejvyšší hodnota M při nejnižší hodnotě H) je směr podél hrany krychlové tělesně centrované buňky [100] a nejobtížnější je ve směru tělesové úhlopříčky tedy [111], směr [110] značí úhlopříčku podstavy. Uvedený příklad platí pouze pro železo, u jiných materiálů může být jinak. Při magnetizaci podél jiného směru než je pro dané feromagnetikum nejvýhodnější se projeví tzv. energie enizotropie, která se snaží krystal orientovat zpět do nejvýhodnější polohy.[6]

Vypočítat celkové nasycené prodloužení pro anizotropní, feromagnetický, materiál, je možno dle následujícího vzorce.[5]

$$\lambda_s = \frac{2}{5}\lambda_{100} + \frac{3}{5}\lambda_{111} \quad (2.2)$$

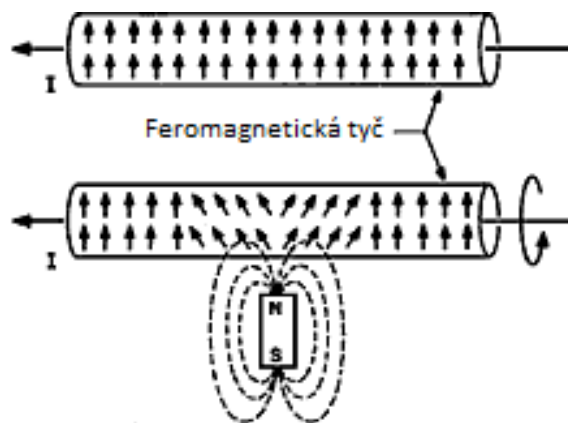
Pokud chceme vypočítat nasycené prodloužení pro směr [110], tak využijeme vzorec následující. [5]

$$\lambda_{110} = \frac{1}{4}\lambda_{100} + \frac{3}{4}\lambda_{111} \quad (2.3)$$

Pro magnetostrikci v izotropních materiálech platí $\lambda_s = \lambda_{100} + \lambda_{111}$. [5]

2.3 Wiedemannův jev

Wiedemannův jev je magnetomechanický jev, který je definován, tak, že válcová tyč, která je vyrobená z feromagnetického materiálu umístěna podélně k působícímu magnetickému poli a navíc jí protéká elektrický proud, je deformována krutem. Krut nastává proto, že v materiálu existují domény, které mění v magnetickém poli orientaci. [8]



Obrázek 2.5: Znáznornění principu Wiedemannova jevu[8]

Opakem Wiedemannovu jevu je Matteuchiho jev, kdy je feromagnetický drát namáhána krutem. [4]

Oproti Jouleově magnetostrickci se při Wiedermanově ani Mateuchiho jevu materiál nemění rozměry. Největší uplatnění obou jevů se nachází v senzorové technice, kdy se používají například v senzorech pohybu. [8]

2.4 Magnetostrikční materiály

Veškeré feromagnetické materiály vykazují určitou, byť někdy velice malou, magnetostrickci, níže si popíšeme pár materiálů, jejichž magnetostrickce je jedna z nejvyšších pro využití magnetostrickčních materiálů v praxi. Vlastnost magnetostrickce úzce souvisí s teplotou a tak se budeme zabývat materiály s největší schopností magnetostrickce při pokojové teplotě.

Material	$\lambda_{100} (10^{-6})$	$\lambda_{111} (10^{-6})$
Fe	24	-22
Ni	-51	-23
TbFe ₂	—	2460
SmFe ₂	—	-2100

Obrázek 2.6: Tabulka s uvedenou magnetostrickcí ve dvou směrech vybraných feromagnetických materiálů při pokojové teplotě [7]

2.4.1 Terfenol-D

Terfenol-D je materiál, jež v dnešní době, ze všech známých materiálů, vykazuje největší možnou magnetostrikci při pokojové teplotě. Dokáže tedy reagovat změnou rozměrů při aplikaci vnějšího magnetického pole, jedná se o změnu energie z jedné formy na druhou. [9]

Jedná se o slitinu kovů vzácných zemin dysprosia (Dy) a terbia (Tb) se železem (Fe), odtud taky je název terfenol-D, kde písmena NOL značí Naval Ordnance Laboratory, laboratoř, kde byla tato slitina poprvé připravena. [9]

Jeden z výrobců Terfenolu-D, firma TdVib LLC, uvádí jako očekávatelné lineární prodloužení 800-1200 ppm při pokojové teplotě a nasycení magnetostrikce při magnetickém poli o intenzitě 1 T. Materiál má relativně vysokou hodnotu Currierovy teploty 380 °C což nám značí, že materiál je schopen magnetostrikce i při vyšších teplotách. Uvádí se schopnost do 200 °C a s přidáním legujících prvků i do záporných, až kryogenních, teplot. Standardní složení se uvádí jako $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,97}$. [9]

2.4.2 Galfenol

Byl objeven v roce 1999 na popud k objevení magnetostrikčního materiálu, který by kombinoval vlastnosti niklu (Ni) a Terfanolu-D, aby byl robustní, mechanicky odolný a vykazoval při tom vyšší hodnotu koeficientu magnetostrikce. Jedná se o slitinu železa s galiem (Ga). S Galfenolem se počítá v příštích generacích vstřikovačů paliva a zařízeních umožňující energy harvesting- přeměna energie z jedné formy na jinou formu energie. [9]

Jeden z výrobců Terfenolu-D, firma TdVib LLC, uvádí jako očekávatelné lineární prodloužení 200-250 ppm při pokojové teplotě a nasycení magnetostrikce při 1,5-1,6 T. Materiál má vysokou hodnotu Currierovy teploty 670 °C což značí, že materiál je schopen magnetostrikce i při vysokých teplotách. Standardní složení se uvádí jako $Fe_{81,6}Ga_{18,4}$. [9]

2.4.3 Neodymový magnet

V dnešní době se jedná o magnety s nejvyšší hodnotou magnetické indukce ze všech magnetů. Neodymové magnety jsou velmi křehké a tvrdé a jsou náchylné ke korozi. Obvyklé složení železo, neodym (Nd) a bor (B) může být rozšířeno o jiné legující prvky například dysprosium a praseodym (Pr). [10]

Tyto přídavné prvky a obzvláště tedy prvky vzácných zemin mohou způsobit vyšší hodnotu koeficientu magnetostrikce a udělat z neodymového magnetu zástupce magnetostrikčních materiálů.

Jeden z výrobců neodymových magnetů, firma ABC MAGNET s.r.o., uvádí Currieovu teplotu 310 °C. Standardní složení se uvádí jako $Nd_2Fe_{14}B$. [10]

3 Braggovská mřížka

3.1 Základní předpoklady

K pochopení principu funkce Braggovské mřížky je potřeba vysvětlit jednotlivé principy a termíny, které s Braggovskou mřížkou souvisejí, jako je například termín světlo a princip chování světla při průchodu z jednoho optického prostředí do druhého.

3.1.1 Světlo

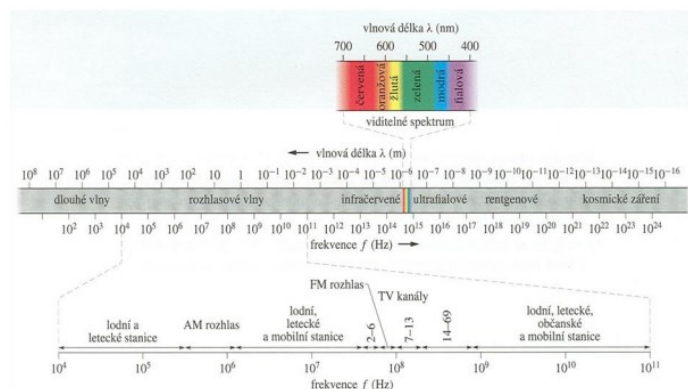
Jedná se o část elektromagnetického spektra, které může vnímat lidské oko, pro potřeby optických komunikací ho budeme nazývat viditelným světlem. Celé elektromagnetické spektrum je znázorněno na obrázku 3.1. Je ohraničeno UV zářením a infra červeným zářením, jejichž hraniční frekvence zahrnujeme do termínu světlo v optických komunikacích. Typicky udávaná frekvence viditelného světla je $f = 3,9 \cdot 10^{14}$ až $7,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, obvykle se frekvence přepočítává na vlnovou délku značenou λ za pomoci jeho rychlosti v daném prostředí značenou v .

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.1)$$

Takto přepočítané viditelné světlo pak má vlnovou délku $\lambda = 380 \text{ nm}$ až 790 nm . Existuje více teorií popisující chování světla, ale v optických komunikacích je dostačující popis světla jako vlny šířící se prostorem.

Rychlost světla ve vakuu je $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ a je konstantou. Pro rychlost světla ve vzduchu platí, takřka rovná rychlosti světla ve vakuu a tak většinou počítáme se vzduchem jako s vakuem, v jiných prostředích se dopočte z indexu lomu, který bude popsán níže.

Termínem monofrekvenční světlo (dříve monochromatické světlo) nazýváme světlo, které má určitou vlnovou délku, u viditelného světla, nepřesně řečeno, jednu barvu a jeho zdrojem je například laser. Veškeré viditelné světlo, když se složí v jedno, tak vznikne bílé světlo. Zdrojem tohoto světla je třeba Slunce či LED dioda a takto širokospektrální světlo nazýváme polyfrekvenčním světlem (dříve polychromatické světlo).



Obrázek 3.1: Elektromagnetické spektrum [11]

3.1.2 Index lomu

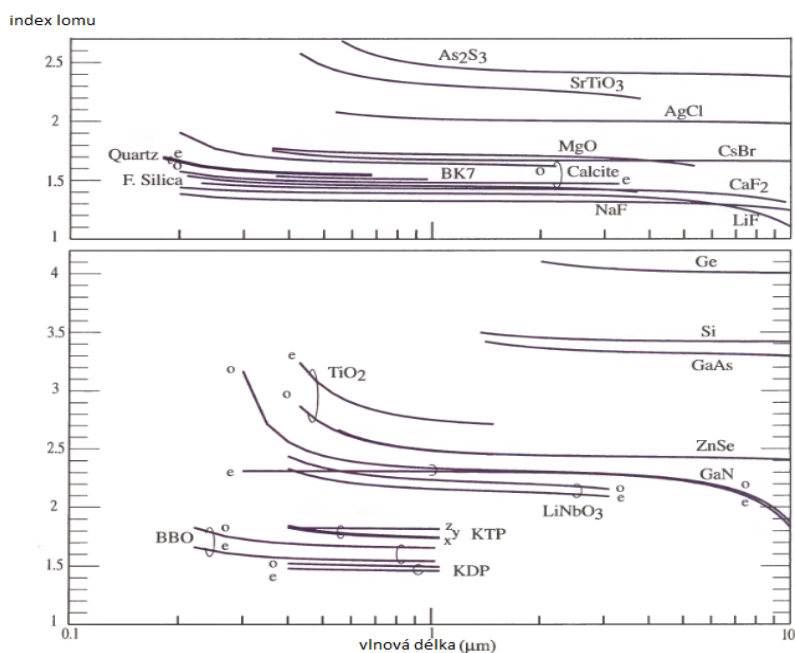
Jedná se o parametr v optických telekomunikacích, který značí, kolikrát se světlo pohybuje v daném prostředí pomaleji, než by se pohybovalo ve vakuu. Pro rychlost světla ve vakuu je index lomu $n = 1$. Rychlost světla v daném prostředí, které není vakuem, značíme v a index lomu pro tuto rychlost se vypočte dle vzorce.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.2)$$

Když doplníme informaci, že rychlost světla ve vakuu je nejvyšší možnou dosažitelnou rychlostí, tak z toho vyplývá, že index lomu je vždy větší nebo roven jedné.

Index lomu jádra optického vlákna je $n_1 = 1,48$ a pro plášť optického vlákna je index lomu $n_2 = 1,46$, tyto čísla indexů lomu se mohou mírně lišit, ale vždy musí platit, že $n_1 < n_2$ a při tom $n_1 \approx n_2$. Aby bylo dosaženo těchto indexů lomu, tak je nutné do křemenného skla (SiO_2) s vysokou chemickou čistotou, jež tvoří optické vlákno přidat nějaký dopovací materiál v nízké koncentraci, například oxid germaničitý (GeO_2). [12][13]

Index lomu ovšem není ve všech vlnovodech konstantou pro všechny vlnové délky světla v daném prostředí, ale pro každou vlnovou délku, v daném prostředí může existovat unikátní hodnota indexu lomu. [12]



Obrázek 3.2: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro různé vlnovody [12]

Závislost indexu lomu na vlnové délce se dá prokázat například rozkladem bílého světla na optickém hranolu, tato problematika bude podrobněji popsána v následující kapitole.

3.1.3 Efektivní index lomu

Je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v daném prostředí neboli vlnovodu. [11]

$$n_{ef} = \frac{c}{v_{vlnovodu}} \quad (3.3)$$

Zavádí se proto, že nám popisuje, jak se světlo šíří v daném prostředí, známe pak jeho přesnou trajektorii, bez něj bychom mohli vlákno pouze změřit a stopovat dobu šíření světla optickým vláknem. [11]

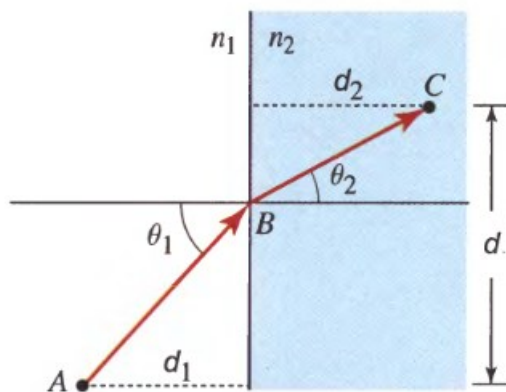
3.1.4 Přechod světla mezi různými prostředími

Pro vysvětlení principu přechodu světla mezi dvěma různými prostředími si musíme ozřejmit dva zákony popisující chování světla.

Fermatův princip říká, že světlo se mezi dvěma různými body pohybuje po takové trajektorii, aby cesta trvala co nejkratší čas, a aby průchod nabýval, extrémní, minimální hodnoty.

Snellův zákon lomu říká, že pokud světlo na projde přes rozhraní z jednoho prostředí do druhého, tak nastane lom světla (refrakce). Rozhraním se rozumí místo, kde se mění homogenní podmínky, kterými doposud světlo putovalo, přechod z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 . Pokud světlo prochází z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, tak nastává lom ke kolmici ($n_1 < n_2$) a naopak pokud světlo prochází z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, tak nastává lom od kolmice ($n_1 > n_2$). Snellův zákon lomu je taky popsán rovnicí. [12]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.4)$$



Obrázek 3.3: *Příklad průchodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího [12]*

Délka cesty na obrázku (Obr. 3.3) z bodu A do bodu C se vypočítá jako: $n_1 \overline{AB} + n_2 \overline{BC}$

Vzdálenost d se vypočítá jako: $d_1 \tan \theta_1 + d_2 \tan \theta_2$

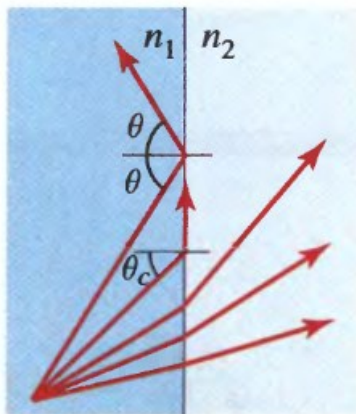
3.1.5 Úplný odraz světla

Jev kdy se světlo po dopadu na rozhraní dvou prostředí odrazí zpět do původního prostředí, se nazývá úplným odrazem světla. Tento jev nastane tehdy, pokud má světlo projít z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího ($n_1 > n_2$) a zároveň lom světla, popsáný úhlem θ_2 je větší než 90° . [12]

Úplný odraz nastane, pokud kritický úhel značený θ_c je menší než úhel θ_1 , kritický úhel, někdy též mezní úhel lomu, se vypočte dle vzorce níže. [12][13]

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (3.5)$$

Zvláštní případ odrazu nastane tehdy, pokud světlo dopadne na rozhraní mezi dvěma prostředími a úhel dopadu θ_1 je roven úhlu kritickému θ_c , to pak světlo pokračuje dále podél rozhraní.

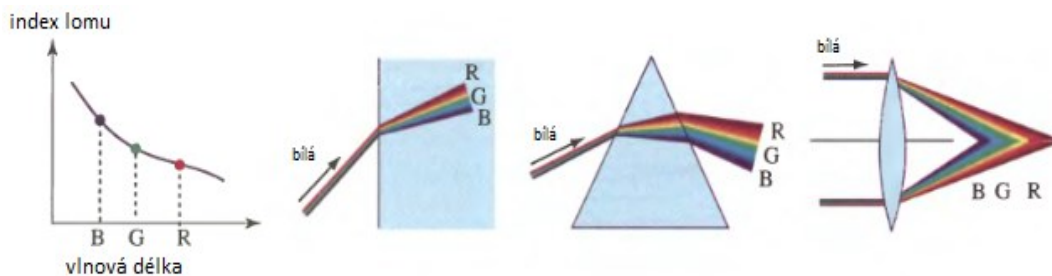


Obrázek 3.4: Dopad světla pod různými úhly na rozhraní mezi dvěma prostředími [12]

Z obrázku (Obr. 3.4) je patrné, že světlo se při odrazu zpět do stejného prostředí odrazí od rozhraní pod stejným úhlem, pod jakým nastal dopad na rozhraní, úhel vztažený k místu odrazu světla. Principem totálního odrazu se šíří světlo optickým vláknem.

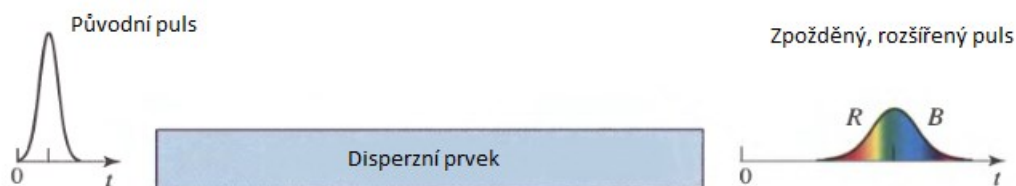
3.1.6 Rozklad světla

Rozklad světla, neboli z anglického výrazu přejatá disperze, je nejlépe popsitelný na viditelném světle, ale nastává i mimo něj. Každá vlnová délka světla se na rozhraní dvou prostředí láme dle Snellova zákona lomu, každá ovšem díky tomu, že úhel lomu ve Snellově zákoně závisí na indexu lomu, který je závislý na vlnové délce. Každá jednotlivá vlnová délka se tak může lámat v jiném úhlu, tato změna úhlu je v disperzním prvku většinou velmi malá, ale dostatečná na to aby se bílé světlo rozložilo na jednotlivé barvy o vlastních vlnových délkách. [12]



Obrázek 3.5: Závislost indexu lomu ve vlnovodu na vlnové délce světla pro jednotlivé složky bílého světla, rozklad bílého světla na rozhraní dvou prostředí, na třetím obrázku je znázorněn optický hranol a na čtvrtém optická čočka[12]

Se závislostí indexu lomu na vlnové délce světla dále souvisí to, že každá vlnová délka se v disperzním prvku pohybuje jinou rychlostí, tak tedy navíc nastává i časový posun, každá vlnová délka se v disperzním prvku pohybuje jinou, vlastní, rychlostí. [12]



Obrázek 3.6: Časové zpoždění pulsu způsobené průchodem přes disperzní prvek[12]

3.1.7 Braggovský odraz

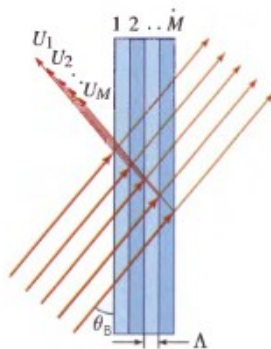
Braggovský odraz značí:

- odrážející se světlo od vícevrstvé struktury;
- rentgenové záření se odráží od atomových rovin v krystalických strukturách;
- světlo se odráží od periodické struktury vytvořené akustickou vlnou;

Braggovský odraz nastane tehdy pokud, světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí pod Braggovským úhlem. Braggovský úhel vypočteme dle následujícího vzorce, kde Λ je perioda změny prostředí.

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (3.6)$$

Monofrekvenční světlo, se v tomto případě odrazí od M ploch, tak, že každá plocha odrazí světlo pouze za předpokladu, že světlo dopadne na tu plochu pod úhlem θ_B [12]



Obrázek 3.7: Odraž světla dopadajícího na M počet ploch [12]

3.1.8 Braggovská rezonanční vlnová délka

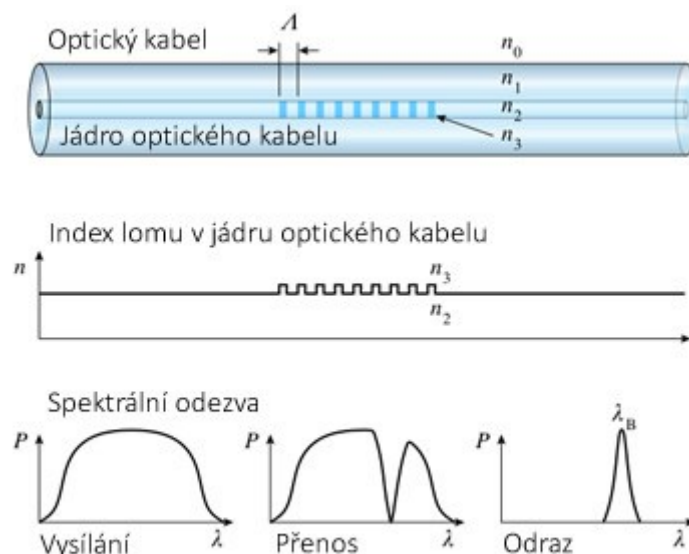
Braggova rezonanční vlnová délka souvisí s Braggovským odrazem a je základní rovnicí pro tvorbu Braggovských mřížek. Za předpokladu, že máme dostatečný počet periodických změn, v Braggovských mřížkách se jedná minimálně o několik tisíc změn indexů lomu, v optickém vlákně, tak se odrazí monofrekvenční světlo zpět do vstupní části optického vlákna a možné ostatní světlo projde vláknem dál, díky této podmínce dále nemusíme s Braggovským úhlem počítat, ale vzorec naopak doplníme o efektivní index lomu n_{ef} , abychom vzorec mohli využít pro výpočty v různých vlnovodech.

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda \quad (3.7)$$

3.2 Braggovská mřížka

FBG (z angl. Fiber Bragg Grating). V roce 1978 Ken O. Hill zjistil u optických vláken dopovaných germániem vliv fotosenzitivity. Když vystavil optické vlákno UV světlu, tak zjistil, že v daném místě byl změněn trvale index lomu. Dalším krokem k realizaci Braggovských mřížek bylo objevení technik zápisu mřížek do optického vlákna, tak aby byla splněna podmínka Braggovy rezonanční vlnové délky, tedy aby bylo umožněno odrážet určité monofrekvenční světlo. Tyto techniky se postupem času zdokonalovaly a v dnešní době není problém sestavit Braggovskou mřížku přesně na danou vlnovou délku a omezila se případná možnost smazání Braggovské mřížky neopatrným zacházením.

Braggovská mřížka je charakterizována jako krátký úsek optického vlákna, v jehož jádře, podél osy z vlákna, se periodicky mění index lomu.



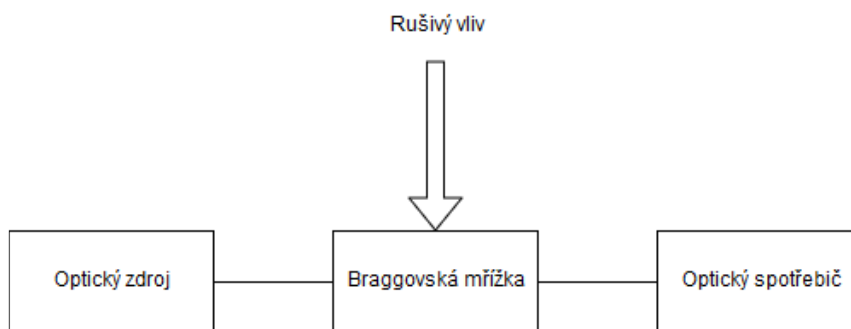
Obrázek 3.8: Braggovská mřížka vepsaná v jádře optického vlákna, periodická změna indexu lomu a spektrální odezva [13]

Braggovská rezonanční vlnová délka je vlnová délka světla, která se po průchodu Braggovskou mřížkou odrazí zpět do optického vlákna, jiné vlnové délky, které mohou optickým vláknem procházet, Braggovskou mřížkou projdou bez ovlivnění. Mohli bychom tedy konstatovat, že Braggovská mřížka se chová jakožto kmitočtový filtr, a to pásmová zadrž pro světlo, jež Braggovskou mřížkou projde nebo pásmová propust pro světlo, které se na Braggovské mřížce odrazí.

Díky principu šíření světla optickým vláknem a všeobecně podmínkám provozu optických komunikací je Braggovská mřížka ideálním prostředím pro zkoumání fyzikálních veličin a chemických změn. Braggovská mřížka našla své uplatnění v senzorové technice, kde postupně nahrazuje elektrické senzory. Její výhody spočívají v tom, že se nenapájí, jsou energeticky pasivní, k měření se využívá jen elektromagnetické záření (světlo), a dále je také imunní vůči elektromagnetickému rušení. Můžeme mít více Braggovských senzorů za sebou na jednom optickém vlákně s využitím WDM – vlnového multiplexu. Při využití výkonného laseru se může měřit na velké vzdálenosti s malou nebo žádnou změnou integrity vstupního signálu. Rovněž je důležité, že se, při určitých aplikacích, podstatně sníží hmotnost sestavy oproti aplikaci konvenčních senzorů. Vzhledem k faktu, že použití Braggovské mřížky je podobné, jako u konvenčních elektrických senzorů, tak nic nebrání jejich plné náhradě Braggovskou mřížkou. Měření na Braggovských mřížkách klade zvýšené nároky pouze na výrobu a případné uchycení Braggovské mřížky. V běžném použití se pak využívají ostatní, již známé prvky z optických komunikací. Braggovské mřížky se rovněž mohou využít v prostředích, kde hrozí výbuchy či požáry anebo v prostředích s vysokou teplotou.

Braggovská mřížka není jedinou strukturou se změnou indexu lomu, která může být vepsána v optickém vlákně, dále existují například čerpované Braggovské mřížky, kde se mění perioda změny indexu lomu, tato mřížka bude popsána později, dále existují Braggovské mřížky

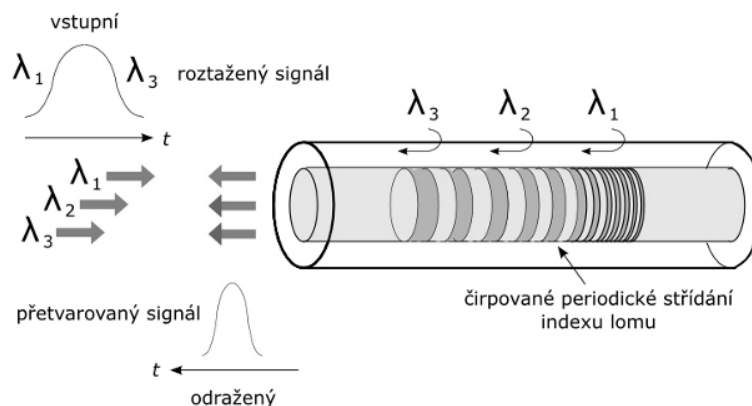
s nakloněnými segmenty, dlouhou periodou a apodizované, které mají specifické použití v různých oblastech.



Obrázek 3.9: Typické blokové schéma zapojení Braggovské mřížky

3.2.1 Čerpovaná Braggovská mřížka

Rozdíl klasické Braggovské mřížky oproti čerpované spočívá v proměnlivé periodě změn indexu lomu. Změna periody může být sestupná i vzestupná či s různými skoky indexu lomu. Princip výpočtu Braggovské rezonanční vlnové délky je jako u klasické Braggovské mřížky s tím, že pro každou rozdílnou periodu se počítá zvlášť. Použití je například u odrazení širšího spektra světla nebo pro kompenzaci disperze, kdy se světlo, které se oproti průměrné rychlosti spektra pohybuje rychleji, odrazí až na konci mřížky a naopak světlo, které se pohybuje oproti průměrné rychlosti svazku pomaleji, tak se odrazí na začátku mřížky. [14]



Obrázek 3.10: Čerpovaná Braggovská mřížka určená pro kompenzaci disperze se spektry rozloženými v čase [14]

3.2.2 Citlivost Braggovské mřížky

Optické vlákno, v němž je vepsána Braggovská mřížka může reagovat změnou délky periody Λ . Tato změna způsobí posun odražené vlnové délky světla λ_B , pokud se perioda zvýší, tak se zvýší i odražená vlnová délka a naopak. Změna periody může nastat například při změně teploty v důsledku teplotní roztažnosti křemenného skla, které tvoří optické vlákno. Roztažnost Braggovské mřížky je přímo závislá na teplotě prostředí a tak lze přesně určit teplotu z odražené vlnové délky světla.

3.2.2.1 *Magnetická pole*

Při měření magnetických polí pomocí Braggovské mřížky nastává problém. Křemenné sklo tvořící optické vlákno je diamagnetickým materiálem a PMMA tvořící jeho plášť, nemá žádné magnetické vlastnosti, a tedy se v nich neprojevuje ani magnetostrikce. Řešením tohoto problému je, uchycení magnetostrikčního materiálu na optické vlákno s Braggovskou mřížkou. Lze například využít magnetostrikční materiál pro výrobu pláště optického vlákna, na němž je Braggovská mřížka. Stačí pouze na tento krátký úsek vlákna, avšak tato metoda je výrobně náročná. Další možností je uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálu pojídlem. Tato metoda je lépe proveditelná při omezených podmínkách, avšak při následné manipulaci je potřeba vysoké opatrnosti z důvodu křehkosti skla. Dalším problémem je, že není možné provést uchycení dvou mřížek stejně, mřížka bude mít například vždy trochu jiné napnutí, což způsobí jinou citlivost na magnetické pole. Pro zkoumání změn magnetického pole je tato metoda však zcela dostačující.

4 Praktická příprava před měřením

Před vlastním zkoumáním a měřením odražených vlnových délek je třeba si Braggovskou mřížku připravit. Příprava probíhá v několika krocích, které budou níže vysvětleny.

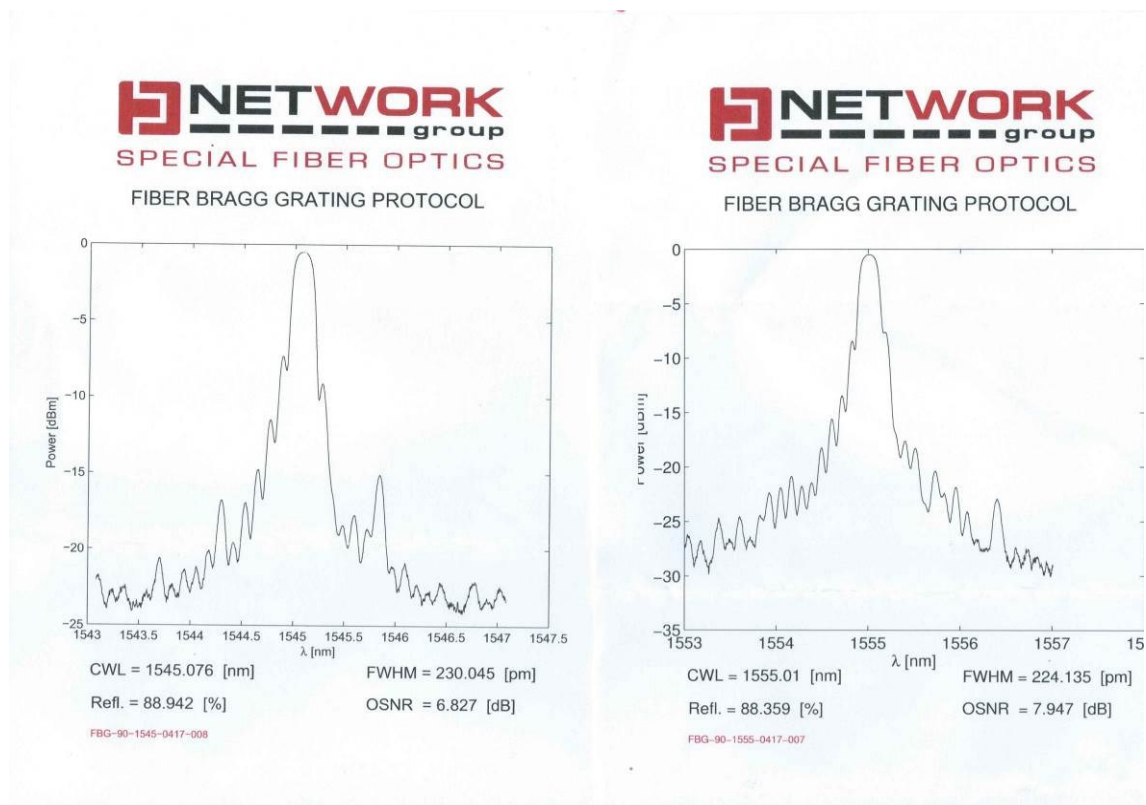
Nejprve se provede uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálu, v tomto případě se jedná o neodymový magnet s přidávanými, legujícími, prvky.

Jelikož je Braggovská mřížka dodávána pouze jako optické vlákno je důležité na toto vlákno napojit tzv. pigtail. Pigtailem se rozumí krátký úsek optického vlákna, jež má primární i sekundární ochranu, na jednom konci má příslušný konektor a na druhém konci nemá nic.

Napojení optických vláken se dá provést více způsoby. Nejlepším způsobem a je to i způsob, který je využit při plnění zadání této BP, tak je tavné svařování.

4.1 Braggovské mřížky k měření

K měření byly použity dvě rozdílné Braggovské mřížky. Tyto mřížky se lišily ve více parametrech, ale nejdůležitější rozdíl byl v odražené centrální Braggovské vlnové délce. Z důvodu nemožnosti stejné napínací síly během uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálu stejně nemohlo být dosaženo naprosto stejné odražené vlnové délky světla i při stejných mřížkách.



Obrázek 4.1: Parametry použitých Braggovských mřížek

Rozdílné Braggovské mřížky ovšem při měření nehrály větší roli, jelikož se zkoumaly pouze rozdíly posunu vlnových délek, případně pokles přijímaného výkonu a nikoli absolutní hodnoty vlnových délek.

4.2 Uchycení Braggovské mřížky k magnetostrikčnímu materiálem

Pro spojení optického vlákna s Braggovskou mřížkou a magnetostrikčního materiálu je důležité vybrat správné lepidlo. Důležitý je výběr lepidla, které je vhodné k lepení železa, což je hlavní prvek, jež tvoří magnetostrikční materiál a akrylátu, který tvoří plášť. Důležitá je nikoli jen schopnost přilnutí, ale rovněž to jak jednotlivé lepidla jsou schopny přenést změnu rozměrů, dalo by se to charakterizovat jako houževnatost výsledného spoje. Při studování různých typů lepidel se z katalogových listů se ukázalo, že nejideálnější lepidla jsou v pořadí:

- Vteřinové kyanoakrylátové lepidlo
- Dvousložkové akrylátové lepidlo
- Dvousložkové epoxidové lepidlo
- Dvousložkové polyuretanové lepidlo
- UV lepidlo
- MS polymer

Pro potřebu měření byly zvoleny první lepidla:

- Vteřinové kyanoakrylátové lepidlo značky Weicon VA100 [15]
- Dvousložkové epoxidové lepidlo značky Cartell CEP-12021 [16]

Magnetostrikční materiál byl před samotným procesem lepení mechanicky očištěn a odmaštěn. Na magnetostrikční materiál byla nanesena vrstva přibližně 1 mm daného lepidla a za napínání byla přiložena Braggovská mřížka, která byla napínána ve vrstvě lepidla do jeho částečného zatuhnutí. Spojení se provedlo oběma typy lepidel na dva magnetostrikční materiály. Před vlastním měření je důležité nechat oba vzorky pořádně zatvrdnout na dobu uvedenou v katalogovém listu výrobce.

Braggovská mřížka vyrobená na odraz vlnových délek v okolí 1545 nm byla k magnetostrikčnímu materiálu uchycena pomocí dvousložkového epoxidového lepidla a Braggovská mřížka na odraz vlnových délek v okolí 1555 nm byla uchycena vteřinovým kyanoakrylátovým lepidlem.

4.3 Příprava Braggovské mřížky na svařování

Optické vlákno s Braggovskou mřížkou je tvořeno pouze jádrem, pláštěm a primární ochranou. Před svařováním je důležité pomocí zdrhovacích kleští odstranit primární ochranu a na lámačce optických vláken konec vlákna zalomit aby bylo vlákno zarovnané. Tato příprava se provedla i pro pigtail, kde se zdrhovacími kleštěmi navíc odstranily i další ochrany. Na závěr bylo důležité očistit izopropylalkoholem připravené konce optických vláken, aby nebyly na spojovacích plochách nečistoty, které by neumožnily svaření.



Obrázek 4.2: Lámačka optických vláken Fujikura CT-30 a zdrhovací kleště

4.4 Svařování optických vláken

Na jedno předpřipravené optické vlákno byla předem navlečena ochrana sváru smrštitelná teplem. Obě optická vlákna byla následně umístěna proti sobě do svářečky Fujikura FSM-45PM. Po nastavení všech parametrů svařování se svařování spustilo. Svářečka po svaření vyhodnotila svar útlumem 0,2 dB, což značí dobrý svar. Při svařování druhé Braggovské mřížky byl udáváný útlum dokonce 0 dB. [17]



Obrázek 4.3: Tavná svářečka Fujikura FSM-45PM

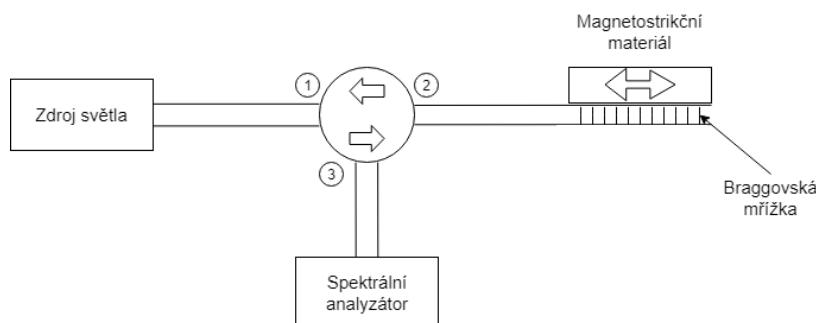
Jako poslední část práce na optické tavné svářečce bylo přiložení navlečené ochrany na svar a její smrštnutí po zapečení ve speciální části svářečky.

Po práci na svářečce byla Braggovská mřížka připravena k měření.

5 Schéma zapojení optické trasy

Pro optickou trasu pro měření bylo potřeba:

- Zdroj světla
- Optický cirkulátor
- Braggovská mřížka uchycená na magnetostrikčním materiálu
- Optický spektrální analyzátor
- Optické propojovací kabely s různými konektory a redukcemi



Obrázek 5.1: *Návrh optické trasy pro zapojení a měření*

5.1 Zdroje světla

Pro měření jsem si zvolil dva optické zdroje, jeden polyfrekvenční zdroj pro měření posunu vlnových délek a druhý laserový s větším monofrekvenčním výkonem pro měření poklesu výkonu či možném ztracení schopnosti odrazit světlo o dané vlnové délce.

5.1.1 Laserový zdroj

Jako laserový zdroj mi posloužil EXFO FLS-2600B umožňující vysílat monofrekvenční světlo v rozmezí vlnových délek 1540 do 1560 nm, centrální vlnová délka $\lambda = 1550$ nm. Maximální vysílací výkon je 0 dBm. [18]



Obrázek 5.2: *Laserový zdroj EXFO FLS-2600B*

5.1.2 SLED zdroj

Jako SLED zdroj posloužil neoznačený zdroj s udávanými parametry výkonu $P = 36,8$ mW, centrální hodnota vlnové délky $\lambda = 1548,2$ nm



Obrázek 5.3: Neoznačený SLED zdroj

5.2 Optický cirkulátor

Jedná se o součást optické trasy umožňující její rozbočení. Jde o výhodnější součástku než je vláknová odbočnice, která je levnější, ale s mnohem vyšším útlumem. Při měření se optický cirkulátor použil kvůli své funkci, kdy světlo při vstupu portem 1 opustí cirkulátor portem 2 a při vstupu světla do portu 2 světlo opustí cirkulátor portem 3. Optický cirkulátor umožnil vést odražené světlo z Braggovské mřížky na spektrální analyzátor.

5.3 Optický spektrální analyzátor

Jako optický spektrální analyzátor jsem použil THORLABS OSA 203. Tento spektrální analyzátor měří vlnové délky světla od 1000 do 2500 nm, rozlišení vlnových délek je 0,2 pm a preciznost měření vlnových délek 0,2 pm. Úroveň citlivosti je u něj -70 dB a maximální vstupní výkon je 10 dbm. Rychlost měření se udává 2 Hz. [19]



Obrázek 5.4: Optický spektrální analyzátor THORLABS OSA 203

Pro měření bylo potřeba do osobního notebooku nainstalovat měřící software THORLABS OSA SW verze 2.80. Notebook se propojuje se spektrálním analyzátozem pomocí GPIB-USB rozhraní umožňující kontinuální měření a zobrazování vlnových délek.

5.4 Uchycená Braggovská mřížka

Braggovská mřížka uchycená k magnetostrikčnímu materiálu má docílit přenosu změny rozměrů vlivem působícího magnetického pole.



Obrázek 5.5: Uchycená Braggovská mřížka epoxidovým lepidlem

6 Praktické měření

6.1 Příprava měření

První činností, co byla potřeba během fáze měření udělat, bylo zjištění, pomocí širokospektrálního SLED zdroje, přesné vlnové délky, které odrážela Braggovská mřížka bez působení magnetického pole. Pro první Braggovskou mřížku, která měla dle poskytnutého listu výrobcem odrážet vlnové délky okolo centrální hodnoty 1545 nm, byla odrážena vlnová délka v okolí 1539,69 nm. Tato hodnota musela být naměřena pomocí režimu spektrálního analyzátoru OSNR - poměr signálu k šumu, jelikož špičková hodnota nebyla přesná z důvodu malého přijímaného výkonu a samotné spektrální charakteristiky SLED zdroje. Změřená odražené vlnové délky o více než 5 nm mohla být způsobena více vlivy, ale pro potřeby měření ničemu nevadila. Druhá Braggovská mřížka, měla odrážet vlnové délky 1555 nm. Po naměření dle režimu OSNR na širokospektrálním zdroji byla naměřena odražená vlnová délka 1554,8 nm. Zde již nebyla deklarovaná odražená vlnová délka a ta skutečně naměřená tak rozdílná.

Za druhé bylo potřeba provést kalibraci laserového zdroje na odražené vlnové délky. To bylo provedeno, tak že se laserový zdroj propojil pomocí optického vlákna přímo se spektrálním analyzátozem a laser byl nastaven na odraženou vlnovou délku a spuštěn. Při porovnání údajů laserového zdroje a spektrálního analyzátoru bylo zjištěno, že hodnoty nejsou shodné a tak byl laserový zdroj přeladován tak, aby se na spektrálním analyzátoru objevila požadovaná vlnová délka. Stejný způsob naladění správné vlnové délky byl použit i pro druhou Braggovskou mřížku. Při tomto nastavování přesných vlnových délek se využilo, že bylo předem známo, že spektrální analyzátor je přesným odčítačem vlnových délek. Laserový zdroj ale není přesným zdrojem, z důvodu neprovedení kalibrace výrobcem nebo jím pověřenou osobou.

Po provedení předcházejících kroků již nic nebránilo provedení samotného měření. Braggovské mřížky byly vystaveny magnetům s různou intenzitou magnetického pole tak, že magnetostrikční materiál byl přímo přiložen na magnet, a v případě, že byly pozorovány nějaké změny oproti výchozímu stavu, stavu bez působení magnetického pole, tak byly mezi magnet a magnetostrikční materiál přidávány vrstvy kartonu o šířce zhruba 1 mm. Přidávání kartonů se provádělo do doby, než se odražené vlnové délky opět přiblížily tomu, jak vypadaly před působením magnetického pole. Přidávané kartony oslabovaly magnetické pole působící na magnetostrikční materiál. Během provádění této fáze měření byly zapisovány naměřené hodnoty. Měření se provádělo pro oba typy zdrojů světla a pro obě Braggovské mřížky.

Během měření byl důležitý výběr pozice na magnetu. Původní myšlenkou měření bylo ovlivňovat vzdáleností silného magnetu od Braggovské mřížky a tím měnit intenzitu magnetického pole. Nicméně, z důvodu použití magnetostrikčnímu materiálu s nižším koeficientem magnetostrikce, než má původně uvažovaný materiál terfenol-D, tato myšlenka nemohla být realizována. Poskytnuté magnetostrikční materiály byly navíc anizotropní, existovalo u nich více směrů magnetizace a použité magnety k měření byly anizotropní též, proto bylo důležité pokládat vždy magnetostrikční materiál na magnet na takovém místě, aby se výrazně projevil vliv magnetostrikce.

6.2 Postup měření

Měření pomocí SLED zdroje, zdroje polyfrekvenčního světla spočívalo ve zkoumání posunu centrální odražené vlnové délky světla naměřené režimem OSNR při působení magnetického pole na magnetostrikční materiál oproti stavu, kdy magnetické pole nepůsobilo. Pro každý směr se v závěru měření vypočetl průměrný posun odraženého světla. Měření jsem přerušil při rozdílu vlnových délek pod 0,1 nm.

Měření pomocí laserového zdroje, zdroje monofrekvenčního světla spočívalo ve zkoumání úbytku výkonu na spektrálním analyzátoru. Před každým měřením jsem prováděl referenční měření, během kterého jsem ladil přijímaný výkon na hodnotu $300 \mu W \pm 10 \mu W$ a odečítal hodnoty po působení magnetického pole na magnetostrikční materiál. Při měření jsem využíval toho, že laserový zdroj není přesně monofrekvenčním zdrojem světla a Braggovská mřížka slaběji odráží i okolní vlnové délky světla. Při překročení hodnoty $290 \mu W$ jsem přerušil měření z důvodu nepřesnosti laserové zdroje, zdroj nevydával stabilní výkon a každý dotyk optického vlákna způsobil změnu výkonu. Z naměřených výsledků jsem vypočítal útlum dle uvedeného vzorce.

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{nam}}{P_{ref}}\right) \quad (6.1)$$

6.3 Měření s kulatým feritovým magnetem

Při měření na kulatém feritovém magnetu se nepodařilo při žádné poloze uchycení magnetostrikčního materiálu na magnetu dosáhnout měřitelné změny odražených vlnových délek nebo změny přijímaného výkonu. Důvodem byla nejspíše nízká hodnota sycení magnetostrikce způsobená malým magnetickým polem vyvozovaným magnetem.



Obrázek 6.1: Braggovská mřížka umístěna na kulatém feritovém magnetu

6.4 Měření s anizotropním feritovým magnetem

Pro toto měření byl využit jeden z nejsilnějších sehnatelných feritových magnetů. Braggovská mřížka byla posunována podél nejdelší hrany.



Obrázek 6.2: Braggovská mřížka umístěna na feritovém anizotropním magnetu

6.4.1 Epoxidové lepidlo

SLED zdroj:

Tabulka 6.1: Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet umístěný přímo, SLED zdroj

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a odražené vlnové délky [nm]				
	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	1539,68	1539,68	1539,67	1539,67	1539,68
2.	1539,69	1539,67	1539,68	1539,67	1539,68
3.	1539,68	1539,67	1539,68	1539,68	1539,68
4.	1539,69	1539,67	1539,67	1539,67	1539,67
5.	1539,68	1539,68	1539,68	1539,68	1539,68
Posun vlnové délky:	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01

Pro měření epoxidového spojení Braggovské mřížky a magnetostrikčního materiálu se povedlo naměřit pomocí daných přístrojů pouze tehdy, když byl magnetostrikční materiál umístěn přímo na magnetu a to ne při všech měřeních na všech pozicích.

Laserový zdroj:

Tabulka 6.2: *Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet umístěný přímo, laserový zdroj*

	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]				
Číslo měření	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	285	284	282	283	283
2.	284	283	281	284	284
3.	285	283	281	281	283
4.	283	285	281	282	283
5.	284	281	283	279	285
Průměrný výkon	284	283	282	282	284
Útlum [dB]	-0,235	-0,25	-0,275	-0,272	-0,244

Tabulka 6.3: *Tabulka pro: 1545nm, feritový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj*

	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]				
Číslo měření	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	300	296	296	297	296
2.	298	295	294	295	297
3.	298	294	297	296	295
4.	299	295	295	296	295
5.	298	294	296	295	298
Průměrný výkon	299	295	296	296	296
Útlum [dB]	-0,020	-0,076	-0,064	-0,061	-0,055

Při měření na laserovém zdroji se u prvního měření podařilo dosáhnout měřitelného útlumu, u druhého měření jsem se již pohyboval v oblasti chyby měření.

6.4.2 Kyanoakrylátové lepidlo

SLED zdroj:

Tabulka 6.4: *Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet umístěný přímo, SLED zdroj*

	Měřená poloha od okraje a odražené vlnové délky [nm]				
Číslo měření	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	1554,68	1554,64	1554,62	1554,62	1554,64
2.	1554,68	1554,65	1554,61	1554,63	1554,63
3.	1554,67	1554,64	1554,62	1554,62	1554,63
4.	1554,68	1554,65	1554,62	1554,62	1554,64
5.	1554,67	1554,64	1554,61	1554,61	1554,63
Průměrný posun světla	0,12	0,16	0,18	0,18	0,17

Laserový zdroj:

Tabulka 6.5: *Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet umístěný přímo, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]				
	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	270	269	270	268	270
2.	272	271	269	267	268
3.	268	267	265	269	269
4.	272	269	267	272	270
5.	269	270	268	266	267
Průměrný výkon	270,2	269,2	267,8	268,4	268,8
Útlum [dB]	-0,454	-0,47	-0,493	-0,483	-0,477

Tabulka 6.6: *Tabulka pro: 1555nm, feritový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]				
	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1.	288	288	288	287	290
2.	289	289	288	289	289
3.	292	290	289	286	289
4.	290	288	288	285	288
5.	288	288	287	287	286
Průměrný výkon	289,4	288,6	288	286,8	288,4
Útlum [dB]	-0,156	-0,168	-0,177	-0,195	-0,171

6.5 Měření s neodymovým magnetem

Neodymový magnet je nejsilnějším permanentním známým magnetem. Měření bylo prováděno na nenarušené hraně.



Obrázek 6.3: *Neodymový magnet použitý při měření*

6.5.1 Epoxidové lepidlo

SLED zdroj:

Tabulka 6.7: *Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet umístěný přímo, SLED zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a odražené vlnové délky [nm]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	1539,67	1539,67	1539,68
2.	1539,68	1539,67	1539,69
3.	1539,66	1539,66	1539,67
4.	1539,67	1539,67	1539,67
5.	1539,67	1539,66	1539,68
Průměrný posun světla	0,02	0,02	0,01

Laserový zdroj:

Tabulka 6.8: *Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet umístěný přímo, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μ W]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	254	238	241
2.	240	241	255
3.	251	243	247
4.	247	240	244
5.	248	248	258
Průměrný výkon	248	242	249
Útlum [dB]	-0,827	-0,933	-0,809

Tabulka 6.9: *Tabulka pro: 1545nm, neodymový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μ W]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	282	285	289
2.	291	284	287
3.	290	287	288
4.	287	280	283
5.	280	290	287
Průměrný výkon	286	285,2	286,8
Útlum [dB]	-0,208	-0,220	-0,195

6.5.2 Kyanoakrylátové lepidlo

SLED zdroj:

Tabulka 6.10: *Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet umístěný přímo, SLED zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a odražené vlnové délky [nm]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	1554,56	1554,55	1554,62
2.	1554,57	1554,55	1554,62
3.	1554,59	1554,55	1554,63
4.	1554,58	1554,54	1554,61
5.	1554,58	1554,55	1554,62
Průměrný posun světla:	0,22	0,25	0,18

Tabulka 6.11: *Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet vzdálený 1mm, SLED zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a odražené vlnové délky [nm]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	1554,76	1554,74	1554,76
2.	1554,76	1554,75	1554,77
3.	1554,76	1554,74	1554,77
4.	1554,77	1554,75	1554,77
5.	1554,77	1554,75	1554,77
Průměrný posun světla:	0,04	0,05	0,03

Laserový zdroj:

Tabulka 6.12: *Tabulka pro: 1555nm, neodymový magnet umístěný přímo, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μ W]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	43	39	47
2.	45	38	42
3.	40	37	48
4.	38	38	43
5.	41	39	45
Průměrný výkon	41,4	38,2	45
Útlum [dB]	-8,601	-8,951	-8,239

Tabulka 6.13: *Tabulka pro: 1555nm, neodýmový magnet vzdálený 1mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	118	107	116
2.	112	114	114
3.	108	116	112
4.	110	108	115
5.	114	106	120
Průměrný výkon	112,4	110,2	115,4
Útlum [dB]	-4,264	-4,349	4,149

Tabulka 6.14: *Tabulka pro: 1555nm, neodýmový magnet vzdálený 2 mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	182	185	194
2.	198	193	187
3.	185	184	180
4.	184	190	186
5.	192	181	195
Průměrný výkon	188,2	186,6	188,4
Útlum [dB]	-2,025	-2,062	-2,02

Tabulka 6.15: *Tabulka pro: 1555nm, neodýmový magnet vzdálený 3 mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	282	286	285
2.	285	283	283
3.	284	285	288
4.	286	281	287
5.	280	278	286
Průměrný výkon	283,4	282,6	285,8
Útlum [dB]	-0,247	-0,259	-0,211

Tabulka 6.16: *Tabulka pro: 1555nm, neodýmový magnet vzdálený 4 mm, laserový zdroj*

Číslo měření	Měřená poloha od okraje a přijímaný výkon [μW]		
	0cm	3 cm	6 cm
1.	298	300	301
2.	297	295	299
3.	299	299	298
4.	300	296	297
5.	301	297	300
Průměrný výkon	299	297,4	299
Útlum [dB]	-0,015	-0,038	-0,015

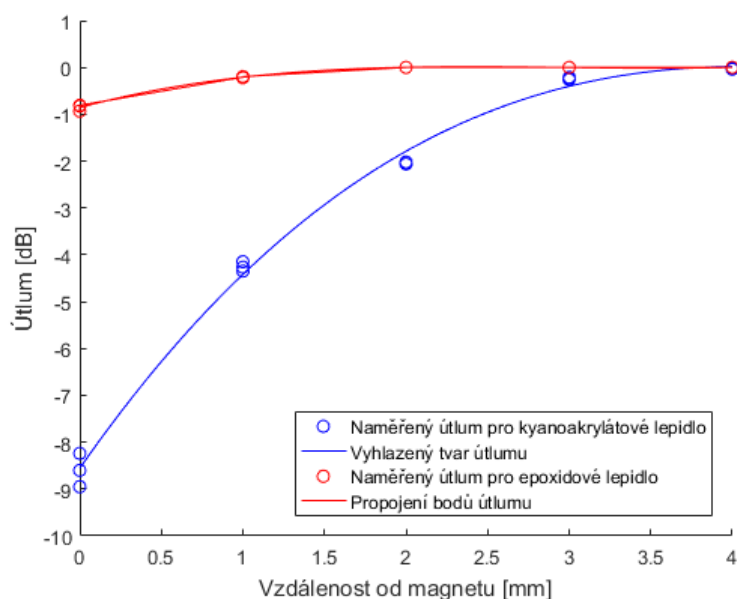
6.6 Vyhodnocení měření

Při měření na anizotropním feritovém magnetu se pomocí SLED zdroje podařilo dosáhnout významného posunu odražených vlnových délek pouze pro uchycení akrylátovým lepidlem. Rozdíl posunu při umístění magnetostrikčního materiálu přímo na magnet mezi akrylátovým lepidlem a epoxidovým lepidlem byl okolo 0,1 nm pro různé polohy měření.

Pro měření útlumu na feritovém magnetu pomocí laserového zdroje se povedlo pro obě lepidla naměřit výsledky pro přímé umístění a při vzdálenosti 1 mm, pro obě měření se povedlo docílit většího útlumu, tedy posunu odražených vlnových délek, pro akrylátové lepidlo.

Při měření na neodymovém magnetu pomocí SLED zdroje podařilo dosáhnout významného posunu odražených vlnových délek pouze pro uchycení akrylátovým lepidlem. Rozdíl posunu při umístění magnetostrikčního materiálu přímo na magnet mezi akrylátovým lepidlem a epoxidovým lepidlem byl okolo 0,2 nm.

Pro měření útlumu na neodymovém magnetu pomocí laserového zdroje se podařilo dosáhnout velmi významných útlumů při uchycení akrylátovým lepidlem. Pro porovnání útlumu je zde graf, kde jsou zprůměrované hodnoty útlumů pro měření na jednotlivých místech.



Obrázek 6.4: Graf útlumů při měření na neodymovém magnetu

Závěr

Bakalářská práce se zabývala vlivem uchycení optického vlákna s Braggovskou mřížkou k magnetostrikčnímu materiálu.

V teoretické části práce jsem se zaměřil na vysvětlení základních principů a chování, které byly důležité během vlastního měření. Vysvětlil jsem chování a dělení magnetických materiálů, co způsobuje magnetostrikční jev a co jej ovlivňuje. Dále jsem popsal vybrané magnetostrikční materiály. Další částí práce bylo popsání chování Braggovských mřížek a citlivost pro měření změn se zaměřením na magnetická pole.

Po vysvětlení teoretických principů, přišla na řadu část praktická. Po prostudování nabídky lepidel na trhu, jsme s vedoucím mé BP vybrali vhodná lepidla k uchycení Braggovské mřížky. Po obdržení magnetostrikčních materiálů neodymových magnetů obohacených legujícími prvky jsem realizoval uchycení Braggovské mřížky ke zmíněným magnetům a opatřil ji konektorem. S vedoucím práce jsme poté vymysleli optickou trasu a připravili pro ni potřebné součásti.

Jakmile byla optická trasa připravena, tak nic nebránilo vlastnímu měření. Jako zdroj magnetického pole k ovlivnění magnetostrikčního materiálu byly využity různé magnety, které jsem ještě ovlivňoval vkládáním kartonů mezi magnet a magnetostrikční materiál, abych viděl, jak to ovlivní výsledky. Při měření jsem byl překvapen, že magnetostrikční materiál vykazoval záporné prodloužení, tedy že materiál měl pro dané magnetické pole a při dané teplotě záporný koeficient magnetostrikce.

Jako mnohem lepší pojídlo jsem z naměřených výsledků vyhodnotil kyanoakryátové lepidlo, které ve všech měřeních vykazovalo větší ovlivnění. U širokospektrálního zdroje vykazovalo větší posun odražených vlnových délek a u laserového zdroje zase větší pokles přijímaného výkonu než lepidlo dvousložkové epoxidové.

Bylo možné dosáhnout lepších výsledků použitím speciálních, průmyslových lepidel a využitím magnetostrikčního materiálu s větším koeficientem magnetostrikce, ale základní bodem BP bylo ověřit, která báze lepidel je pro uchycení výhodnější a to se zjistilo.

Použitá literatura

- [1] Encyklopedie fyziky. Magnetické vlastnosti látek [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [2] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. Fyzika I. Vyd. 0., verze 1.0, Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005.
- [3] Magnetické vlastnosti látek. Studopory [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_10_Magneticke_vlastnosti.pdf
- [4] COEY, J. M. D. Magnetism and magnetic materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-81614-4.
- [5] CHIKAZUMI, Sōshin a C. D. GRAHAM. Physics of ferromagnetism. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1997. ISBN 0-19-851776-9.
- [6] KRATOCHVÍL, Bohumil. Základy fyziky a chemie pevných látek. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1990. ISBN 80-7080-055-0.
- [7] BUSCHOW, K. H. J. a F. R. de BOER. Physics of magnetism and magnetic materials. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, c2003. ISBN 0-306-47421-2.
- [8] SENSOR TECHNOLOGY AND DESIGN. Magnetostrictive Level Sensors [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <http://archives.sensorsmag.com/articles/1002/level/main.shtml>
- [9] TdVib LLC. Materials [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <http://tdvib.com/materials/>
- [10] ABC magnet. Neodymové magnety (FeNdB) [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=neodymove-magnety>
- [11] VUT-VŠB. Optické komunikace I. Pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO, [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <https://vut-vsb.cz/home/get-file?file=439&portal=Portal2>
- [12] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl. TEICH. Fundamentals of photonics. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley Interscience, 2007. ISBN 978-0-471-35832-9.
- [13] BOTEĞ. Optické vláknové mřížky (FBG), [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <https://www.boteg.cz/cz/fiber-bragg-grating/>
- [14] Access server. Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovidového vlákna, [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020001>
- [15] Technický list CEP-12021, Metrum [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: http://www.element-shop.cz/user/19844/upload/stuff/files/13051102-tl_cartell_cep-12021-12022_cz_09_12-epoxyd.pdf

- [16] Technický list VA100, Weicon [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.742-008.1.pdf>
- [17] Technický list FSM-45PM, Fujikura [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <http://www.fujikura.com.cn/images/pdf/Acrobat10.pdf>
- [18] Uživatelský návod FLS-2600b, EXFO [online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: https://www.profiber.eu/files/produkty/meracia%20technika_opticke_komunikacie/laboratoria_a_vyroba_vlaknovej_optiky/Tunable_Laser_Source_FLS_2600B/User_Guide_FLS_2600B_english_1061853.pdf
- [19] Uživatelský návod THORLABS OSA203, THORLABS[online]. [cit. 2018-04-2] Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/d288e587f713686b-A7333F2E-B398-5DBB-1CCC8AC5A8B107AF/OSA203-Manual.pdf>